

数10MeV領域中性子の平板ファントム内における線量分布に関する研究

著者	中根 佳弘
号	2393
発行年	1999
URL	http://hdl.handle.net/10097/7666

氏 名	なか ね よし ひろ 中 根 佳 弘
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 11 年 9 月 8 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学位規則第 4 条第 1 項
研 究 科, 専 攻 の 名 称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 量子エネルギー工学専攻
学 位 論 文 題 目	数 10MeV 領域中性子の平板ファントム内における線量分布に 関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 中村 尚司
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 中村 尚司 東北大学教授 北村 正晴 東北大学教授 石井 慶造 東北大学助教授 馬場 護

論 文 内 容 要 旨

1. 序

加速器施設や宇宙などの中高エネルギー粒子場における放射線安全設計を行う上で、粒子が構造体や遮蔽体に入射した際に生成する 2 次中性子、特にこれまでほとんど評価されていない 20MeV 以上の中性子による線量の評価が重要となる。近年になって中高エネルギー粒子輸送計算コードを用いて 20MeV 以上の中性子に対する線量換算係数の評価が行われるようになった。しかしながらこの線量評価手法において、これまで 20MeV 以上の中性子入射による線量測定実験値を用いた精度評価は行われていない。本研究は、数 10MeV 領域中性子入射における線量評価手法の確立に必要な実験値を取得することを目的として、原研高崎 TIARA の 40 及び 65MeV 準単色中性子入射における平板ファントム内での中性子束及び吸収線量分布を測定し、粒子輸送計算コードによる解析結果と比較した。また実験解析に必要な中性子線源スペクトル及び検出器応答関数の測定及び計算評価を行った。これらの評価結果を基に、40 及び 65MeV 準単色中性子入射における線量評価手法を用いた平均線質係数及び線量当量計算の精度評価を行った。さらにファントム表面での線量測定における荷電平衡の問題から、数 10MeV 領域中性子場における個人被ばく線量計を用いた線量評価に対する問題点を提起し、具体的な解決策について検討を行った。

2. 中性子線源スペクトルの評価

本研究で線量分布測定実験を行った原研高崎 TIARA の準単色中性子場において、これまで測定されていなかった 40 及び 65MeV 準単色中性子源における 10MeV 以下の低エネルギー領域線源スペクトルを球形多減速材付き ^3He スペクトロメータを用いて測定するとともに、 ^7Li ターゲットからの距離、ビームコリメータ厚さ、ビームストッパの有無、の線源スペクトルへの影響について MCNP-4B コードを用いて計算し、異なる実験条件に対する中性子源スペクトルを評価した。その結果、実際の低エネルギー領域スペクトルはこれまで遮蔽実験などの解析に用いられてきた、TOF 測定値の下限を 1/MeV で外挿したスペクトルと比較して数 MeV 以下の領域で大きく持ち上がっていることが判った。TIARA 中性子場のコリメータ径は上流から下流まで同じ大きさであることからコリメータ内における中性子の散乱が多く、このことが低エネルギー中性子が多い要因の 1 つと考えられる。単色中性子場において低エネルギー中性子の生成の抑制は極めて重要であり、設計の段階において低エネルギー中性子の生成に対する十分な検討を行う必要があることを明らかにした。ここで評価され

た線源スペクトルは本研究の実験解析における中性子線源スペクトルとして用いるとともに、今後 TIARA 準単色中性子場において低エネルギー中性子にも感度を有する検出器及び線量計を用いた測定を行った際の線源スペクトルとして有益なデータとなる。

3. 固体飛跡検出器の応答特性評価

4. に述べるファントム内中性子束分布測定実験に用いる反跳陽子型固体飛跡検出器の応答関数について、これまでに評価がなされていない 20MeV 以上の領域を含む 250keV から 65MeV までの単色中性子標準場（東北大 FNL 及び CYRIC, 原研 TIARA）において測定するとともに、100keV から 80MeV までの広範な入射中性子エネルギーに対応した応答関数計算コードを開発し、実験結果と比較した結果、45MeV までの実験値をほぼ再現することができた。一方で 65MeV における計算値は実験値より小さくなったが、これは実験値及び計算値の双方の求め方に課題があることを示した。また計算結果から、応答関数に寄与する粒子の種類、粒子生成位置の情報を得ることができた。ここで得られた応答関数計算値はファントム内中性子束分布測定実験の解析に用いた。固体飛跡検出器の 20MeV 以上の応答関数については測定及び計算の何れにおいても過去に例がなく、本研究で得られた応答関数は数 10MeV 領域における固体飛跡検出器の利用において非常に有益なデータとなる。

4. 平板ファントム内中性子束分布の評価

数 10MeV 領域中性子入射における人体模擬物質内での中性子束分布計算の精度評価を行うため、TIARA の 40 及び 65MeV 準単色中性子が 30cm 立方の亚克力樹脂製平板ファントムに入射した際の体系内中性子束分布を、エネルギー特性の異なる 2 種類の検出器（核分裂計数管、固体飛跡検出器）を用いて測定し、計算コードによる解析結果と比較した。10MeV 以上の中性子に対する感度が大きい ^{238}U 核分裂反応率分布について HETC-3STEP コードと MORSE-CG コードを 15MeV で接続計算した結果は、ファントムの浅い領域では実験値を良く再現するものの、深い領域では実験値との差が大きくなり、深さ 25cm では実験値を 22～33% 過大評価した。一方で HILO86 群定数を用いた MORSE-CG コードのみによる計算結果はファントムの深い領域においても実験値を 15% 以内で再現した。また 10MeV 以下の中性子に対する感度が大きい固体飛跡検出器の反応率分布においては、ファントムが検出器のラジエータと同様に機能してしまう問題、検出器応答の持つ入射中性子の角度に対する依存性の問題等により、検出器反応率分布計算において十分な精度をもった計算を行うことができなかった。結果の傾向として、深さ 5cm までの反応率分布計算結果は実験値を 16～28% 過小評価し、深さ 10cm 以上では実験値と一致、あるいは最大 27% の過大評価となった。ここで得られた中性子束分布の精度評価結果は、ファントム内吸収線量及び線量当量分布計算の精度評価に用いた。

5. 平板ファントム内吸収線量分布の評価

数 10MeV 領域中性子入射における人体模擬物質内での吸収線量分布計算の精度評価を行うため、上述の中性子束分布測定と同様の条件でファントム内における吸収線量分布を人体組織等価型比例計数管 (TEPC) を用いて測定した。また 65MeV 準単色中性子入射においてはガンマ線の寄与を含む吸収線量を人体組織等価型電離箱により測定した結果、TEPC 実験値と誤差範囲内で一致した。また吸収線量分布の計算手法として、15MeV 以上の中性子に対しては HETC-3STEP コードにより 2 次荷電粒子の沈着エネルギー分布から吸収線量分布を算出し、15MeV 以下の中性子に対しては MORSE-CG コードで計算した中性子スペクトルと中性子 Kerma 係数から吸収線量分布を算出した。その結果、40 及び 65MeV 準単色中性子入射における実験値を概ね 10% 以内で再現した。また比較のため、全てのエネルギーの中性子による吸収線量を中性子 Kerma 係数による計算手法（中性子スペクトルは MORSE-CG コードにより計算）で求めた結果、ファントム内線量分布においては実験

値を概ね 7%以内で再現したが、ファントム表面における計算結果は実験値と比較して 38-60%も過大となった。これは数 10MeV 領域中性子に対するファントム表面での線量測定において荷電平衡が成り立っておらず、Kerma 近似が成立しないためである。ここで得られた吸収線量分布の精度評価結果は、ファントム内線量当量分布計算の精度評価に用いた。

6. 数 10MeV 領域における中性子線量当量の評価

上述の TEPC によるファントム内吸収線量測定で得られた吸収線量の y 分布に ICRU-40 の線質係数 $Q(y)$ を用いて線量当量分布及び平均線質係数の実験値を得た。また吸収線量計算に用いた HETC-3STEP/MORSE-CG コードシステムにおいて、A-150 プラスチックに対する衝突阻止能を実験値と同じ $Q(y)$ に適用して平均線質係数を求め、線量当量分布及び平均線質係数の計算値を得た。計算で得られた平均線質係数は実験値を 16%以内で再現し、それを用いた線量当量の計算結果も実験値を概ね 20%以内で再現したことから、数 10MeV 領域中性子に対する線量評価手法を用いた線量当量評価は 20%程度の精度で可能であることが判った。5.の吸収線量における測定値と計算値の差が概ね 10%以内で一致したのに対し、線量当量における差が概ね 20%以内と大きくなっているのは、後者が吸収線量の微分量に依存しているためで、吸収線量の微分量 (y 分布もしくは LET 分布) に僅かなずれがあるためと考えられる。また荷電平衡が成立していないファントム表面における線量に対して、ファントム内における線量の最大値との差を計算により評価した結果、65MeV 準単色中性子入射では吸収線量で 1.7 倍、線量当量で 1.2 倍となることが判った。この結果から、数 10MeV 領域中性子による被ばく線量を人体の表面に装着した個人被ばく線量計の読み値で評価すると線量を過小評価してしまう問題点を提起し、その解決策として線量評価手法による計算が有効な手段であることを示した。

7. まとめ

本研究における線量測定実験値を用いた線量評価手法の精度評価は、数 10MeV 領域中性子による線量評価の観点から中高エネルギー粒子場における放射線安全設計及び線量評価において重要な意味を持つものと思われる。また数 10MeV 領域の準単色中性子標準場においてファントム内における中性子束及び線量分布を測定し、計算解析を行った例は過去に存在しないことから、本研究によって得られたこれらの成果は線量評価コードにおける精度評価のベンチマーク実験として、また今後の線量評価手法の改良に非常に有益なデータとなるものと思われる。

審査結果の要旨

加速器施設や宇宙環境などの中高エネルギー粒子場の放射線安全設計において2次生成中性子による被曝線量評価は重要である。しかしながら線量評価手法において、これまで線量に大きく寄与している 20MeV 以上の中性子による実験値を用いた精度評価は行われていない。本論文は、線量評価手法の確立に必要な数 10MeV 中性子入射における平板ファントム内での中性子束及び吸収線量分布の測定、その測定に必要な中性子線源スペクトル及び検出器の応答関数の測定を行い、これらの測定結果を基に線量当量計算における精度評価を行ったものであり、全文7章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、実験を行う 40 及び 65MeV 準単色中性子線源において、これまで測定されていなかった 10MeV 以下の線源スペクトルを測定し、それに基づいて平板ファントムに入射する線源スペクトルを計算評価した結果、これまで用いられてきた 10MeV 以上のスペクトル測定値を外挿したスペクトルより低エネルギー中性子成分がはるかに多く、この寄与の評価の重要性を明らかにした。

第3章では、ファントム内での中性子束分布の測定に用いる固体飛跡検出器の 100keV～80MeV までの入射中性子に対する応答関数計算コードを開発するとともに、250keV から 65MeV までの単色・準単色中性子標準場において測定した応答関数と比較することにより、その計算精度を評価し、20MeV 以上の中性子に対するこの検出器の応答関数を始めて明らかにしている。

第4章では、40 及び 65MeV 準単色中性子入射における平板ファントム内での中性子束分布を、測定エネルギー領域の異なる2種類の検出器（固体飛跡検出器、小型核分裂計数管）を用いて測定し、粒子輸送モンテカルロコードを用いた 10MeV 以上の中性子による反応率分布計算結果が実験値を 20% 以内の精度で再現することを明らかにした。

第5章では、40 及び 65MeV 準単色中性子入射における平板ファントム内での吸収線量分布を人体組織等価の比例計数管及び電離箱を用いて測定し、両者の測定値が実験誤差内でよく一致していることを示し、粒子輸送モンテカルロコードを用いた吸収線量計算結果と比較し、計算による吸収線量評価が 10% 以内の高い精度で行えることを明らかにしている。また 15MeV 以上の中性子に対して2次荷電粒子の付与エネルギーから求めた吸収線量評価はファントム表面における吸収線量測定値を再現するのに対し、中性子 Kerma 係数を用いた吸収線量評価は荷電平衡が成立していないファントム表面における吸収線量測定値を過大評価することを明らかにしている。

第6章では、前章において精度評価した吸収線量を用いて、数 10MeV 領域における線量当量分布を実験的に求め、これを線量評価手法による計算結果と比較し、線量当量において2割の裕度で計算評価が可能であることを示している。また数 10MeV 中性子入射に対してファントム表面では荷電平衡が成立していないことから、個人被曝線量計による被曝評価は人体の受ける被曝線量を過小評価することを示し、この解決策として本線量評価手法による線量計算が極めて有効であることを提言している。

第7章は結論である。

以上、本論文は数 10MeV 領域中性子に対する吸収線量のベンチマーク実験データを取得し、それに基づき線量評価手法の精度を評価したものであり、放射線安全工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。